

危险废物处理技术现状及发展趋势

羊建波 常青 杨逸 王悦

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘要] 为了摸清国内危险废物的技术发展现状及未来技术发展趋势,本文梳理对比目前国内外各种危险废物预处理、无害化技术的特点及应用范围,分析了各种危险废物资源化利用的方法及技术现状,并按冶金危险废物、石化及化工危险废物、医疗危险废物、再生资源回收利用、多种危险废物协同处理分类,总结目前危险废物处理的主流技术、先进技术和未来可能推广应用的技术。分析结果表明,焚烧处理是我国危险废物主要的处理方式,回转窑焚烧技术应用较为广泛。我国危险废物资源化利用技术水平与发达国家相比还存在一定差距,未来无害化、资源化、协同化和智能化处理技术将是危险废物处理技术创新或优化的主要方向。

[关键词] 危险废物;预处理技术;无害化处理;资源化利用

[中图分类号] X327

[文献标志码] A

[文章编号] 1008-5122(2023)04-0066-06

DOI:10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2023.04.014

0 前言

随着经济的快速发展,我国危险废物的产生量逐年增多。2021年全国危险废物产生量为8189万t^[1],较2011年增加了6599万t,年均复合增长率为11.78%,但2016—2021年年均增速缓降至6.3%,呈现总量增加但增速下降的态势。“十四五”期间,我国危险废物的总量仍将不断增加,环境问题亦将日益严峻。在绿色高质量发展的背景下,提高危险废物的无害化和资源化利用技术水平尤为重要。

本文以危险废物作为研究对象,系统梳理危险废物的处理技术现状及未来发展趋势,结合国家层面推荐的先进适用技术,罗列危险废物处理的主流技术、先进技术和未来可能推广应用的技术,以期为企业和广大学者提供技术信息支撑。

1 危险废物概述

危险废物是指列入国家危险废物名录或者根据

国家规定的危险废物鉴别标准和鉴别方法认定的具有危险特性的固体废物。按照《国家危险废物名录》(2021年版),危险废物分46个大类、467个品种,包括工业危险废物、医疗废物和其他社会源危险废物等(图1)。其中,工业危险废物占总量的70%以上,其次为医疗废物,约占14%。工业危险废物中80%来源于化工、电子、机械等制造业和热电、通讯、冶炼等行业。

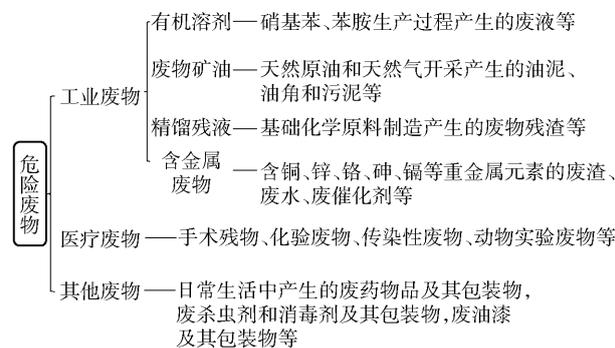


图1 危险废物的分类

综合利用和处置是目前工业危险废物处理的主要途径。2019年,工业危险废物综合利用量占总产量的47.2%,处置量占比为38.5%,贮存量占比为14.3%^[2]。

[收稿日期] 2022-08-19

[作者简介] 羊建波(1981—),女,江苏靖江人,博士,工程师,主要从事矿业经济研究工作。

[引用格式] 羊建波,常青,杨逸,等.危险废物处理技术现状及发展趋势[J].绿色矿冶,2023,39(4):66-71.

2 危险废物的处理技术现状

危险废物的处理技术主要包括预处理、无害化、资源化三方面(图2)。

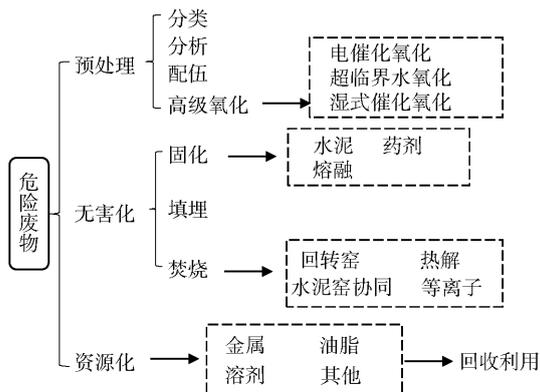


图2 危险固废处理方式简图

2.1 危险废物的预处理技术

由于危险废物品种繁多,化学成分复杂,因此预处理阶段必不可少。预处理过程包括分类、分析、配伍三个主要步骤,有时因物料特殊性质可能还需进行二次预处理。预处理可以实现前端的减量化、有效分离、分类等,从而可以减轻后处理压力。随着新材料的不断涌现和新装备的投入使用,高级氧化技术如电催化氧化、湿式催化氧化、超临界水氧化技术已从有机废水处理拓展至危险废物预处理。高级氧化技术设备投入大,更加节能,操作更简单,在欧美等发达国家已有成功运用,但在国内没有形成大规模应用^[3]。其中,超临界水氧化法在欧美国家广泛应用于塑料降解、有机废水以及生物污泥的处理当中^[4-5]。

2.2 无害化处置技术

无害化技术中,应用较多的有焚烧、热解气化、固化、填埋等方法。各种技术的特点见表1。

表1 危险废物无害化处置技术的特点及适用范围

方法	技术	技术特点	适用范围
焚烧	回转窑焚烧技术	去除率可达99.99%以上	国家环保部危险废物处理推荐技术
	水泥窑协同处置技术	飞灰产生少,成本低,处置种类多,邻避效应较小	主要用于工业危险废物,如废化学药剂、含油废物等
	等离子体焚烧技术	反应快、二次污染小、能耗高,尾气还需处理	适用生活垃圾、轮胎、医疗废物等可燃性工业废弃物
热解技术	—	环境污染少,经济性好	主要用于医疗废物
快速碳酸化处理技术	—	快速反应、成本较高	多用于废石灰、电石渣、飞灰、钢铁渣、建筑废料等
填埋	地下或地上	最终处置方法	适用于最终处理产物
	深地质处置		适用于放射性固废
固化	水泥固化	材料廉价、处置成本,但易二次污染	主要用于重金属的稳定化处理,土壤去污处理
	药剂固化		
	熔融固化		

2.2.1 焚烧

焚烧处理是目前危险固废主要的处理方式,是无害化、减量化的有效手段。焚烧技术主要包括回转窑焚烧技术、水泥窑协同处置技术、等离子体焚烧技术等。其中,回转窑焚烧技术是国内危险废物处理领域广泛应用的技术,是国家环保部发布的危险废物处理政策中推荐的技术。水泥窑协同处理技术在国外应用较为广泛,国内近些年来也在推广,但我国在处置危险废物的运营、监管等管理体系尚不完善,业内专家、学者对该技术的广泛应用都保持谨慎的态度。等离子体焚烧技术是对固体危险废物物进行熔融处理的一种关键技术^[6],适合于医疗垃圾、飞灰、钢渣、电镀污泥、铬

渣、放射污染等固体危险废物的环保处理,目前发达国家已建成了一些基于等离子体技术的处理装置,并投入工业化运行^[7]。在中国,上海固废处置中心已引入美国等离子体焚烧技术。

2.2.2 热解气化

热解气化技术是指有机物在无氧或缺氧条件下的高温分解技术,是一种有效处理医疗固体废弃物的手段。缺氧环境下的热降解不仅降低环境污染,还能对医疗废物进行最大化资源化利用。混合医疗废物的热解气化及热解后生成产物的资源化利用是未来的技术研究方向^[8]。

2.2.3 稳化/固化

稳化/固化技术是危险废物无害化处置的重要

技术方法,适用于工业危险废物以及污染土壤的处理,包括药剂固化、水泥固化以及熔融固化等。目前稳定化/固化技术已经比较成熟,与焚烧以及堆肥技术相比,其处置成本更低,可有效杜绝二次污染,大规模高效处理含油污泥是未来固化处理技术的研究方向。

2.2.4 快速碳酸化技术

快速碳酸化技术的原理是将危险废物全部暴露于浓度较高的二氧化碳环境中,经过特定化学反应,使有害物质在热反应的作用下进行分解,生成其他不具备危害或危害程度较低的物质,最终降低危险固体废弃物的危害程度^[9]。快速碳酸化技术最初被用于矿产行业中,随着技术的不断创新,逐渐应用于危险固体废弃物的无害化处置,如

钢铁渣、电石渣、废石灰等的焚化炉灰、废弃建筑材料以及金属冶炼废渣等。尽管处置效果较好,但工艺相对复杂,经济成本较高,大规模应用还有诸多难题需要解决。

2.3 资源化利用技术

资源化回收技术是以减少危险废物排放为目的,回收能再次利用的物质,降低危险废物对周边环境的危害的方法。危险废物的资源化主要集中于金属、油脂、溶剂、塑料等物质的回收利用。目前资源化利用技术主要应用于废酸、废矿物油、含油污泥、废有机溶剂、废盐、废包装桶、废催化剂等废弃物的回收,主要方法和技术发展现状见表2。下文着重阐述有色冶炼渣金属回收技术和废线路板(WPCBs)回收技术。

表2 危险废物资源化利用主要技术的特点及发展现状

序号	技术	主要方法	技术现状
1	废酸回收技术	浓缩法、萃取法、高温裂解法、化学氧化法、聚合法、蒸馏法膜分离技术等	暂无较好的工业化实例
2	废矿物油及含油污泥回收技术	地耕法、堆肥法或者生物反应器等	国外废油再生利用技术较为成熟;国内水平落后,应用较少
3	废有机溶剂回收技术	精馏、萃取蒸馏、减压蒸馏、共沸蒸馏等,还有应用膜分离、萃取、干燥、中和、吸附等	一般废有机溶剂再生技术已接近国际先进水平,但电子化学品的有机溶剂回收技术仍落后于发达国家
4	废盐回收技术	采用预处理(高温裂解、焚烧、高温氧化、溶剂萃取等)脱除有机物杂质,再采用分步结晶分盐工艺提取高纯盐产品	国内还缺少相应的废盐处置技术规范及资源化标准
5	废包装回收技术	自动化流水线成套设备	大批量旧桶的翻新是主流趋势,逐渐接近发达国家水平
6	废催化剂回收技术	高温焙烧浸出法、离子交换法、化学法(酸碱中和、氧化还原法)以及微波消解等方法回收铂、铑、钯等	目前的催化剂利用缺乏相应的技术投入,工艺设备及技术相对于国外水平不高
7	冶炼渣有价金属回收技术	电化学法、沉淀法、吸附法、离子交换法和液膜分离法	离子交换法暂未大规模应用;液膜分离法发展迅速;吸附法、离子交换法和液膜分离法将逐渐代替沉淀法和电化学法
8	废线路板回收技术	机械处理、火法冶金、热解法、熔盐法、湿法冶金、生物冶金、超临界流体回收法、物理填充等	机械处理法是最广泛方法之一,低温热解可替代火法冶金,熔盐法和超临界流体法仍处于实验室阶段

2.3.1 有色金属冶炼渣金属回收技术

目前有色金属冶炼废渣有价金属提取大多采用的是湿法冶炼工艺,其基本原理就是将有色金属冶炼渣进行酸碱化、电化学等方式处理,从而保证废渣中的有价金属被有效提取^[10]。湿法冶炼工艺溶液控制相对容易,提取的金属纯度高,金属回收率也较高。主要方法有电化学法、沉淀法、吸附法、离子交换法和液膜分离法等^[11]。液膜分离法在近几年发展迅速,开发稳定高效的液膜是其主要研究方向^[12]。吸附法、离子交换法和液膜分离法三种方法的广泛应用将逐渐代替易产生二次污染的沉淀法和

成本高的电化学法。

2.3.2 废线路板(WPCBs)资源回收技术

对于废线路板资源回收,目前国内外成熟的方法有机械分离法和湿法,较为成熟的有火法和热解法,最新出现的方法有微生物及超临界法等。

机械处理法是目前WPCBs回收应用最广泛方法之一,未来的研究重点包括有毒金属的分离、减少破碎过程中有机物的分解及探索分选效率更高的方法等^[13];湿法大多用于回收WPCBs中的贵金属,例如硫脲浸金和硫代硫酸盐浸金方法是取代氰化物浸金的两种最有前景的方法,暂无大规模工业应用,未

来研究重点为浸滤液选择与后续分离操作^[14];火法冶金主要有焚烧熔出工艺、高温氧化熔炼工艺、电弧炉烧结工艺等,未来熔池熔炼可作为废线路板主流处理方法,此外废线路板可与低品位铜污泥、杂铜等协同熔炼;低温热解是一种可替代火法冶金的处理方法,但废电路板热解处理技术尚未成熟,不具备规模化运作的条件,但具有良好的发展前景;生物冶金尚未应用到工业中,未来研究重点在于菌种浸出效率的提高、高效工程菌的选育、细菌氧化活性的增强等;超临界流体技术包括超临界流体萃取工艺和超临界流体氧化工艺,是一种理想的预处理技术,目前多为实验室试验,尚不能大规模应用。

3 危险废物处理技术发展趋势

《第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中明确提出了“2030年碳达峰”的目标,危废处置作为生态环保中重要的一环,未来在政策日趋严格的背景下,其预处理、无害化和资源化技术将不断创新

或优化。政策层面以源头减量为主,鼓励提高资源综合利用率;在预处理方面,着重开发自动化处理装备,提高分选效率;在资源化利用方面,突破废酸废油污泥等回收的瓶颈技术,重点研究膜分离技术、含油污泥大规模高效处理、混合医疗废物及热解后产物的资源化利用、有色冶炼渣湿法冶金的金属提取技术、废线路板资源化利用技术、多种危险废物协同冶炼技术等;在先进技术开发方面,除了积极引进国际先进技术装备并加以改进外,还要积极参与全球性危险废物处理技术研发课题,努力提升自主创新能力。

根据历年《国家工业资源综合利用先进适用工艺技术设备目录》《矿产资源节约和综合利用先进适用技术目录》《“无废城市”建设试点先进适用技术汇编》,结合相关文献资料,按冶金危险废物、石化及化工危险废物、医疗危险废物、再生资源回收利用、多种危险废物协同处理分类,总结了相关的主流技术、先进技术/推广技术和未来技术/研发技术(表3)。

表3 危险废物处理技术总结

危险废物种类	已有技术/主流工艺	先进技术/推广技术	未来技术/研发技术
黑色/有色冶金危废	(1)废旧镍铜、镍铁合金利用技术	(1)回转窑-电炉(RKEF)高效回收镍、钴、锡技术	
	(2)炼铁除尘灰综合利用技术	(2)低品位铜矿生物提铜技术	
	(3)电解铝废料分离提纯技术	(3)“双底吹”连续炼铜技术	
	(4)银转炉渣湿法处理技术	(4)火法富集、湿法分离多段耦合集成处理工艺技术	(1) 有色技术绿色萃取(药剂选取和萃取环境优化)技术
	(5)二次铝灰制备聚合氯化铝联产高铝复合材料技术	(5)金属矿采选废水生物制剂协同氧化深度处理与回用技术	(2) 离子交换技术
	(6)富氧燃烧回转窑冶炼渣处置及有价技术利用装备	(6)利用镍铁渣制备镍铁渣微粉的粉磨生产线	(3) 液膜分离法
	(7)连续熔池熔炼侧吹技术	(7)黄金冶炼氧化渣除氧和金属回收技术	(4) 真空蒸馏冶金技术
石化及化工危废		(8)含砷重金属冶炼废渣治理与资源化利用技术	
	(1)废润滑油生产再生基础油技术	(1)“旋风闪蒸-薄膜再沸-双向溶剂精制”废矿物油再生基础油成套装备技术	(1) 气化渣脱碳与铝硅资源分质利用技术
	(2)废弃油脂制备生物柴油成套技术	(2)油基泥浆全价值回收利用一体化技术	(2) 工业连续化含油污泥热裂解成套技术及装备
	(3)丙烯酸及脂类废油资源化处理技术	(3)钻井泥浆热解析处理资源化技术	(3) 两相流旋流器
	(4)精对苯二甲酸(PTA)残渣资源综合利用技术	(4)工业副产石膏干法生产高强度石膏技术	(4) MAC-CAR(活性膜生物反应器技术、纳滤反渗透技术)
	(5)废弃四氯化碳生产四氯乙烯技术	(5)分子闪解白色垃圾(塑料)和油泥资源化利用技术及装备	(5) 有机固废闪蒸干化耦合热解气化装备
	(6)碱回收白泥生产轻质碳酸钙技术	(6)工业连续化含油污泥热裂解成套技术及装备	(6) 微波裂解废盐处理装备
(7)废SCR脱硝催化剂高效循环利用技术	(7)工业废盐炭化热解技术及成套装备	(7) 高真空蒸馏-力口氢精制技术	

续表 3

危险废物种类	已有技术/主流工艺	先进技术/推广技术	未来技术/研发技术
医疗废物	(1) 危险废物逆流高效焚烧-高温熔融技术 (2) 热解(气化)技术 (3) 高温高压蒸汽灭菌技术	(1) 高温干热处置医疗废弃物设备及技术 (2) 医疗废物高温蒸汽处理技术	(1) 等离子体技术 (2) 电弧炉处理技术 (3) 磁化裂解技术
再生资源回收利用	(1) 废旧含铜废弃物制备高纯亚微米超微细铜粉 (2) 废旧电路板富氧顶吹熔池熔炼工艺技术装备 (3) 废铅蓄电池资源清洁低碳循环技术及装备 (4) 废旧新能源汽车动力电池无害化回收处理再生技术	(1) 印制线路板氯盐酸性蚀刻液循环再生回用技术 (2) 含汞荧光灯管中稀土富集及综合利用技术 (3) 线路板低温物理研磨分离元器件技术 (4) 废旧锂离子电池清洁高效回收利用技术与装备 (5) NGL 炉处理废杂铜技术 (6) 侧吹处理废铅物料成套技术	(1) 废线板热解处理技术 (2) 废线路板熔盐处理技术 (3) 废线路板湿法冶金提取贵金属技术 (4) 物理填充处理废线路板非金属粉技术
多种危废协同处理	(1) 电子废弃物与多金属固废协同处置回收技术 (2) 冶金生泥磁化熔融炉协同处置垃圾焚烧飞灰工艺技术及装备 (3) 铜铁烟尘及有色金属冶炼渣资源化清洁利用新技术 (4) 有机危废无氧热解资源化利用技术装备	(1) 水泥窑系统处置生活垃圾焚烧飞灰技术 (2) 危废焚烧飞灰、炉渣配制式高温熔融资源化利用技术 (3) 危险废物处置-熔渣回转窑焚烧技术 (4) 危险废物在线利用处置装置-XA 脱硫废液干法制酸技术	(1) 粉煤灰提取氧化铝联产超白玻璃、分子筛、硅肥等集成技术 (2) 含铜污泥与废线路板协同处理与综合利用技术 (3) 澳斯麦特炉协同处理铜精矿和废电路板技术 (4) 高温窑炉协同处置钢铁危险废物技术

4 结束语

目前焚烧处理是危险废物主要的处理方式,包括回转窑焚烧技术、水泥窑协同处置技术等。我国危险废物处理起步晚,无害化和资源化利用整体水平仍有待提高,不同细分行业技术表现差异较大。预处理技术比较粗放,分选归类的自动化、智能化程度低,配伍标准不完善;资源化利用技术(如等离子体焚烧技术、废矿物油及含油污泥回收技术等)水平与发达国家相比还存在一定差距。我国正引进国外先进的处理技术及系统装置,但需根据现实情况对技术设备进行优化改造。

我国危险废物产业当前处于快速发展阶段,很多新技术正在研发阶段,如超临界水氧化技术在危险废物预处理过程中的应用,离子交换法、液膜分离法在有色冶炼渣有价金属提取中的应用,热解法、熔盐法在废线路板综合利用中的应用等。

未来危险废物处理仍以“减量化、资源化、无害化”为原则,在信息化、智能化、协同化发展的大趋势下,强化源头减量化和资源化技术创新或优化,提高危险废物的综合利用效率,加强综合处置能力。

[参考文献]

- [1] 前瞻产业研究院. 2022 年中国危废处理行业全景图谱 [R/OL]. <https://www.qianzhan.com/analyst/detail/220/220223-27e7c017.html>.
- [2] 生态环境部. 2020 年全国大、中城市固体废物污染环境防治年报 [R/OL]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/gtfwrrfz/>.
- [3] 胡文静,徐梦兰,杨林. 危险废物处置技术研究现状及趋势分析[J]. 广东化工,2021,48(17):114-115.
- [4] 徐婧. 工业危险固体废物的五大处置技术[J]. 中国资源综合利用,2020,38(5):89-90,116.
- [5] 李诺,刘诚,刘苏宁,等. 超临界水氧化技术研究进展[J]. 有色冶金节能,2020,36(6):16-21.
- [6] 张晓波. 热等离子体处理技术在固体危险废物处理中的应用[J]. 节能与环保,2021(11):88-89.
- [7] 周俐萍,陈坚栋. 中美危险固体废物管理比较研究及对我国的启示[J]. 生态经济,2009(10):170-173.
- [8] 方书起,崔俊乐,白净,等. 医疗固体废物处理技术综述[J]. 应用化工,2019,48(11):2677-2688.
- [9] 田峰. 工业固体危险废物处置技术[J]. 商品与质量,2020(21):113.
- [10] 贾康乐. 浅析有色冶金废渣中的有价金属回收技术

- [J]. 中国金属通报, 2021(12):19-21.
- [11] 李林涛. 有色金属冶炼废渣中的有价金属可回收技术探讨[J]. 世界有色金属, 2019(19):9, 12.
- [12] 张汉鑫, 李慧, 梁精龙, 等. 有色冶炼废渣中有价金属回收的冶金方法应用之综述[J]. 中国钨业, 2018, 33(4):69-73.
- [13] 潘德安, 和盛鑫, 杨飞华, 等. 典型有机-无机复合材料废弃物处置技术的研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2022, 40(3):508-519.
- [14] 赵斌, 武晓燕, 魏显珍, 等. 废线路板资源化回收技术研究与发展[J]. 再生资源与循环经济, 2016, 9(8):31-34, 38.

Present Situation and Development Trend of Hazardous Waste Treatment Technology

YANG Jianbo, CHANG Qing, YANG Yi, WANG Yue

Abstract: In order to find out the technical development status and future technical development trend of hazardous waste in China, this paper combed and compared the characteristics and application scope of various hazardous waste pretreatment and harmless treatment technologies at home and abroad, and analyzed the methods and technical status of various hazardous waste resource utilization. According to the classification of metallurgical hazardous waste, petrochemical and chemical hazardous waste, medical hazardous waste, recycling of renewable resources, and collaborative treatment of various hazardous wastes, the current mainstream technologies, advanced technologies and future technologies were summarized. The analysis results show that incineration is the main treatment methods of hazardous waste in China, and rotary kiln incineration technology is widely used. There is still a certain gap between China and developed countries in the technical level of hazardous waste resource utilization. In the future, harmless, resource-based, collaborative and intelligent treatment technologies will be the main direction of technological innovation or optimization of hazardous waste treatment.

Key words: hazardous waste; pre-treatment technology; harmless treatment; resource utilization